

# PERANCANGAN SISTEM WEARABLE IOT MULTISENSOR BERBASIS BIOFEEDBACK SEBAGAI MEDIA INTERVENSI DAN MONITORING UNTUK MENINGKATKAN SELF-AWARENESS PADA ANAK ADHD.

Muhammad Reza<sup>1</sup>, Martiano<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Indonesia

Email: [zaarzee25@gmail.com](mailto:zaarzee25@gmail.com)

## ABSTRAK

*Attention Deficit Hyperactivity Disorder* (ADHD) merupakan gangguan perkembangan saraf yang ditandai dengan kesulitan pemusatan perhatian, impulsivitas, dan hiperaktivitas akibat defisit metakognitif dan disregulasi pada sirkuit *prefrontal cortex* (PFC). Metode pemantauan konvensional saat ini masih bersifat *open-loop* dan mengandalkan observasi subjektif yang sering terlambat mendeteksi fase disregulasi. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan Sistem *Wearable IoT Multisensor* Berbasis *Biofeedback* sebagai media intervensi dan monitoring lingkaran tertutup (*closed-loop*) untuk meningkatkan *self-awareness* pada anak ADHD secara *real-time*. Sistem dikembangkan menggunakan pendekatan rekayasa perangkat lunak berbasis *Agile Scrum*. Perangkat keras wearable dirancang ergonomis berbasis mikrokontroler ESP32-C3 SuperMini (32-bit RISC-V 160MHz) yang mengintegrasikan tiga sensor fisiologis dan kinetik, yaitu sensor *Galvanic Skin Response* (GSR) dengan kalibrasi *dual-slope*, sensor Photoplethysmogram (PPG) MAX30102 untuk deteksi denyut jantung (Heart Rate/HRV), dan sensor *Inertial Measurement Unit* (IMU) 6-Axis MPU6050 untuk klasifikasi gerak hiperaktif. Unit intervensi menggunakan motor vibrasi haptik *Eccentric Rotating Mass* (ERM) yang dikendalikan via driver transistor NPN S8050. Data biometrik dikirimkan melalui protokol MQTT (broker lokal port 1883 dan public cloud broker [broker.emqx.io](https://www.emqx.io)) serta WebSocket (port 5001) menuju Web Dashboard Interaktif TanStack / Vite. Hasil pengujian menunjukkan sensor MAX30102 memiliki tingkat akurasi 97,23% (error 2,77%) terhadap gold standard medis, kalibrasi *dual-slope* GSR mampu membedakan kondisi lepas udara (0  $\mu$ S), kondisi tenang (4,5–8,0  $\mu$ S), dan kondisi disregulasi ( $\geq 10,0$   $\mu$ S), serta algoritma sensor *fusion decision logic* berhasil membedakan gairah fisik murni dengan disregulasi emosional guna mencegah false positive. Latensi transmisi data MQTT tercatat rata-rata 91 ms (QoS 1) dengan packet loss 0%, dan baterai Li-Po 500mAh mampu beroperasi selama 6–7 jam. Sistem ini terbukti efektif memberikan intervensi taktil instan secara diskret sehingga membantu melatih kesadaran interoseptif anak ADHD untuk memulihkan fokus tanpa menimbulkan *sensory overload*. Kata Kunci: ADHD, Wearable IoT, Biofeedback, ESP32-C3, GSR, MAX30102, MPU6050, MQTT, Self-awareness.

## ABSTRACT

*Attention Deficit Hyperactivity Disorder* (ADHD) is a neurodevelopmental disorder characterized by deficits in attention, impulsivity, and motor hyperactivity resulting from metacognitive dysfunction within prefrontal cortex circuits. Conventional monitoring methods are predominantly open-loop and rely on subjective observations that frequently fail to detect disregulation in real time. This study aims to design and implement a Biofeedback-Based Multisensor Wearable IoT System as a closed-loop intervention and continuous monitoring tool to enhance self-awareness in children with ADHD. The system is engineered using the Agile Scrum methodology. The wearable

prototype is built upon the ESP32-C3 SuperMini microcontroller (32-bit RISC-V 160MHz), integrating three physiological and kinetic sensors: a Galvanic Skin Response (GSR) sensor with dual-slope calibration, a MAX30102 Photoplethysmography (PPG) sensor for heart rate and pulse variability, and an MPU6050 6-Axis Inertial Measurement Unit (IMU) for motor hyperactivity classification. The intervention mechanism employs an Eccentric Rotating Mass (ERM) haptic vibration motor driven by an S8050 NPN transistor circuit. Telemetry data is streamed via MQTT protocol (local broker port 1883 and public cloud broker broker.emqx.io) and WebSocket (port 5001) to a modern TanStack / Vite Web Dashboard. Experimental results demonstrate that the MAX30102 sensor achieves 97.23% accuracy (2.77% mean error) relative to medical gold standard oximeters, dual-slope GSR calibration accurately distinguishes unattached states ( $0\ \mu\text{S}$ ), baseline calm states ( $4.5\text{--}8.0\ \mu\text{S}$ ), and dysregulation states ( $\geq 10.0\ \mu\text{S}$ ), and the sensor fusion decision logic effectively differentiates pure physical arousal from emotional distress to eliminate false positives. MQTT latency averaged 91 ms (QoS 1) with 0% packet loss, while the 500mAh Li-Po battery provides 6–7 hours of continuous operation. The closed-loop Biofeedback system successfully delivers discrete real-time tactile nudges that train interoceptive awareness and restore academic focus without inducing sensory overload.

Keywords: ADHD, Wearable IoT, Biofeedback, ESP32-C3, GSR, MAX30102, MPU6050, MQTT, Self-awareness.

## PENDAHULUAN

*Attention Deficit Hyperactivity Disorder* (ADHD) merupakan gangguan perkembangan saraf yang ditandai oleh kesulitan mempertahankan perhatian (*inattention*), hiperaktivitas (*hyperactivity*), dan perilaku impulsif (*impulsivity*). Kondisi ini umumnya muncul sejak masa kanak-kanak dan dapat memengaruhi proses belajar, kemampuan mengendalikan perilaku, serta interaksi sosial. Sejumlah penelitian epidemiologi menunjukkan bahwa prevalensi ADHD pada anak usia sekolah secara global berada pada kisaran 7–10% dan cenderung mengalami peningkatan. Kondisi tersebut menempatkan ADHD sebagai salah satu gangguan perkembangan yang membutuhkan perhatian multidisipliner, khususnya dalam bidang kesehatan, pendidikan, dan teknologi (Kediri, 2022).

Gangguan perhatian dan regulasi diri pada anak dengan ADHD dapat memberikan dampak langsung terhadap proses pembelajaran dan perkembangan sosial. Kesulitan mempertahankan fokus dapat menyebabkan anak kehilangan informasi penting, kurang mampu menyelesaikan tugas, serta menunjukkan perilaku impulsif yang terkadang dipersepsikan sebagai bentuk kenakalan. Dampak lanjutan dapat berupa penurunan prestasi akademik, rendahnya kepercayaan diri, dan hambatan dalam membangun hubungan sosial karena sering memperoleh teguran atau penolakan dari lingkungan. Apabila tidak memperoleh penanganan yang tepat, permasalahan tersebut berpotensi berlanjut hingga masa remaja dan dewasa dalam bentuk kesulitan psikososial, seperti kecemasan, depresi, dan hambatan adaptasi di lingkungan pendidikan maupun pekerjaan (Fitri, 2025).

Penanganan ADHD yang bersifat konvensional masih menghadapi keterbatasan, terutama karena pemantauan perilaku banyak bergantung pada observasi dan laporan guru atau orang tua yang umumnya dilakukan setelah perilaku disruptif terjadi. Intervensi perilaku yang dilakukan di luar lingkungan belajar juga belum sepenuhnya mampu menggambarkan kondisi anak secara langsung ketika

menghadapi situasi pembelajaran yang nyata. Ketidadaan mekanisme umpan balik secara *real-time* menyebabkan anak belum memperoleh penguat langsung untuk melakukan regulasi perilaku ketika mulai mengalami distraksi. Kondisi ini menjadi semakin penting mengingat prevalensi ADHD pada anak usia sekolah diperkirakan mencapai 8,0–14% secara global (Ardiansyah et al., 2025).

Perkembangan teknologi *wearable* memberikan peluang untuk mengatasi keterbatasan tersebut. Namun, sebagian perangkat yang dikembangkan untuk ADHD masih menggunakan pendekatan *open-loop*, yaitu sebatas merekam dan menyajikan data tanpa memberikan intervensi secara langsung. Di sisi lain, perangkat klinis tertentu memiliki keterbatasan dari aspek biaya dan portabilitas. Kondisi tersebut menunjukkan adanya kebutuhan terhadap sistem *wearable* yang mampu mengintegrasikan pemantauan kondisi fisiologis dan aktivitas gerak secara simultan. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan sistem yang memadukan sensor *Galvanic Skin Response* (GSR), *Heart Rate* (HR), dan *Inertial Measurement Unit* (IMU) untuk mendeteksi perubahan kondisi anak secara *real-time* serta memberikan intervensi berupa getaran atau *haptic nudge* ketika pola disregulasi teridentifikasi.

Penelitian ini mengusulkan “Perancangan Sistem *Wearable IoT Multisensor Berbasis Biofeedback*” sebagai perangkat pendukung regulasi diri dan proses belajar anak dengan ADHD. Sistem memanfaatkan kombinasi data GSR, HR, dan IMU untuk mengidentifikasi perubahan kondisi fisiologis dan aktivitas gerak yang berkaitan dengan disregulasi. Integrasi mekanisme *closed-loop biofeedback* memungkinkan sistem tidak hanya melakukan pemantauan, tetapi juga memberikan stimulus haptik secara otomatis sebagai penguat agar anak kembali memusatkan perhatian pada aktivitas pembelajaran. Selain itu, *dashboard monitoring* memungkinkan orang tua dan terapis memantau perkembangan fokus anak secara *real-time*. Dengan pendekatan tersebut, sistem diharapkan dapat mendukung pembentukan pola belajar yang lebih tenang, teratur, dan produktif.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa (*engineering research*) dengan metode pengembangan sistem berbasis *Agile Software Development*. Metode ini dipilih karena sistem yang dikembangkan berupa *wearable Internet of Things* (IoT) multisensor yang memerlukan proses perancangan, implementasi, pengujian, evaluasi, dan penyempurnaan secara iteratif melalui beberapa siklus (*sprint*).

Sistem yang dikembangkan berupa perangkat *wearable* berbasis ESP32-C3 yang mengintegrasikan sensor *Galvanic Skin Response* (GSR), *Photoplethysmogram* (PPG) menggunakan MAX30102, dan *Inertial Measurement Unit* (IMU) menggunakan MPU6050. Sistem dirancang untuk memperoleh data fisiologis dan aktivitas gerak secara *real-time*, melakukan pemrosesan data secara lokal (*edge computing*), memberikan *Biofeedback* melalui motor haptik, serta mengirimkan data ke *dashboard*

monitoring menggunakan protokol MQTT. Sistem diarahkan untuk mendukung *self-awareness* dan regulasi diri pada anak dengan ADHD.

Pengembangan sistem dilakukan melalui tahapan identifikasi kebutuhan, perencanaan *sprint*, pengembangan dan integrasi, pengujian, evaluasi, serta penyempurnaan prototipe. Identifikasi kebutuhan dilakukan melalui studi literatur dan observasi untuk menentukan kebutuhan fungsional dan teknis, meliputi pemantauan detak jantung, konduktansi kulit, aktivitas gerak, *Biofeedback* taktil, komunikasi Wi-Fi dan MQTT, serta *dashboard* monitoring data secara *real-time* dan historis. Kebutuhan tersebut selanjutnya disusun dalam *product backlog* dan dikembangkan secara bertahap berdasarkan prioritas dan risiko teknis.

Pada tahap implementasi, ESP32-C3 berfungsi sebagai unit pemrosesan utama yang menerima data dari sensor GSR, MAX30102, dan MPU6050. Data sensor diproses melalui akuisisi, penyaringan (*filtering*), kalibrasi, normalisasi, dan ekstraksi parameter. Hasil pemrosesan dibandingkan dengan *threshold* untuk menentukan kondisi sistem. Ketika parameter terdeteksi melewati ambang batas, ESP32-C3 mengaktifkan motor haptic melalui transistor S8050 sebagai bentuk intervensi taktil. Data hasil pengukuran dikemas dalam format JSON dan dikirim melalui MQTT ke sistem *cloud*, kemudian disimpan dalam basis data *time-series* dan ditampilkan pada *dashboard* monitoring.

Perangkat keras terdiri atas ESP32-C3, sensor GSR dengan konfigurasi *custom Wheatstone Bridge*, MAX30102, MPU6050, ERM *haptic motor*, baterai Li-Po 3,7 V, modul TP4056, regulator tegangan, dan transistor S8050. MAX30102 dan MPU6050 berkomunikasi melalui antarmuka I<sup>2</sup>C, sedangkan GSR menggunakan masukan analog (ADC) ESP32-C3. Konfigurasi tersebut membentuk arsitektur *closed-loop Biofeedback* yang mencakup akuisisi data, pemrosesan, pengambilan keputusan, intervensi, dan monitoring.

Pengujian dilakukan melalui *unit testing*, *integration testing*, dan *black-box testing*. *Unit testing* digunakan untuk menguji pembacaan sensor dan proses kalibrasi, sedangkan *integration testing* menguji komunikasi antara ESP32-C3, sensor, broker MQTT, dan basis data. *Black-box testing* digunakan untuk memastikan fungsi sistem berjalan sesuai keluaran yang diharapkan, khususnya mekanisme *thresholding* dan *Biofeedback trigger*. Pengujian komunikasi juga dilakukan dengan mengukur keberhasilan transmisi dan waktu respons sistem, dengan target latensi kurang dari 100 ms.

Evaluasi prototipe mencakup aspek teknis, fungsional, dan *usability*. Aspek teknis meliputi akurasi dan konsistensi sensor, keandalan komunikasi, latensi, dan keberhasilan aktivasi aktuator. Aspek fungsional mencakup kemampuan pemantauan multisensor, pemrosesan data, pemberian *Biofeedback*, pengiriman data melalui MQTT, dan penyajian informasi pada *dashboard*. Aspek *usability* meliputi kenyamanan penggunaan, kesesuaian bentuk dan ukuran perangkat, respons terhadap getaran haptic, serta kemudahan penggunaan *dashboard* oleh pendamping.

Data hasil pengujian dianalisis secara kuantitatif dan deskriptif. Analisis kuantitatif digunakan untuk memperoleh nilai akurasi sensor, persentase keberhasilan fungsi, latensi komunikasi, dan konsistensi pengiriman data. Sementara itu, hasil observasi penggunaan prototipe dianalisis secara deskriptif untuk menggambarkan kenyamanan, respons terhadap intervensi haptik, dan kemudahan penggunaan sistem. Hasil evaluasi setiap siklus digunakan sebagai dasar penyempurnaan prototipe hingga diperoleh sistem *wearable* IoT yang mampu melakukan pemantauan multisensor, pemrosesan data, pemberian *Biofeedback*, dan pengiriman informasi secara terintegrasi.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Implementasi Sistem

Implementasi sistem merupakan tahap penerjemahan perancangan teoritis dan skematik menjadi bentuk fisik prototipe *wearable* serta lingkungan perangkat lunak yang saling terintegrasi. Pada bagian ini, hasil perakitan komponen fisik, struktur *firmware* pada mikrokontroler ESP32-C3, serta antarmuka *dashboard* Web monitoring dijelaskan secara komprehensif.

#### 1. Implementasi Perangkat Keras (Hardware Wearable)

Perangkat keras *wearable* direalisasikan dalam bentuk unit smartwatch terintegrasi dengan dimensi casing 110mm x 45mm x 50mm (dengan lebar strap 3cm dan panjang lingkaran pergelangan 8cm) berbahan Thermoplastic Polyurethane (TPU) hypoallergenic yang dicetak menggunakan teknologi 3D Printing. Pemilihan material ini bertujuan untuk memastikan keamanan kontak fisik jangka panjang pada kulit anak dengan ADHD serta mencegah terjadinya akumulasi panas dari komponen daya. Pusat pemroses utama menggunakan ESP32-C3 SuperMini berbasis arsitektur 32-bit RISC-V 160MHz. Pengintegrasian komponen dilakukan melalui tata letak papan rangkaian tercetak (Printed Circuit Board / PCB) kustom dua sisi (double-sided) yang memisahkan jalur daya tegangan tinggi dengan jalur sinyal analog yang rentan terhadap noise.

**Tabel 1 Pemetaan Pin dan Konfigurasi Antarmuka Perangkat Keras.**

| Nama Komponen / Sensor | Pin Mikrokontroler ESP32-C3 | Antarmuka Komunikasi          | Modul Daya / Referensi Tegangan | Fungsi Spesifik Sistem                  |
|------------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|
| Sensor MAX30102        | GPIO 8 (SDA), GPIO 9 (SCL)  | I <sup>2</sup> C (Shared Bus) | 3.3V DC / Shared Power          | Akuisisi Sinyal PPG (Heart Rate & HRV)  |
| Sensor MPU6050         | GPIO 8 (SDA), GPIO 9 (SCL)  | I <sup>2</sup> C (Shared Bus) | 3.3V DC / Shared Power          | Deteksi Hiperaktivitas Motorik 6-Axis   |
| Sensor GSR Custom      | GPIO 0 (ADC1_CH0)           | Analog Voltage (ADC)          | 3.3V DC / Low Noise Regulated   | Pembacaan Konduktansi Kulit ( $\mu S$ ) |

|                       |                                          |                    |                             |                                        |
|-----------------------|------------------------------------------|--------------------|-----------------------------|----------------------------------------|
| Motor Haptic ERM      | GPIO 4 (PWM Driver Transistor NPN S8050) | GPIO / PWM Control | 3.7V Direct Li-Po via S8050 | Stimulus Intervensi Taktil / Vibration |
| TP4056 & Li-Po 500mAh | System VCC & GND                         | Direct Power Rail  | Baterai Li-Po 3.7V Boosted  | Suplai Energi & Manajemen Portabilitas |

Pada Gambar 1 penempatan sensor pada casing bawah dilakukan secara presisi, dua elektroda stainless-steel sensor *Galvanic Skin Response* (GSR) diletakkan secara kontiguitas pada area epidermis pergelangan tangan bagian ventral. Di antara kedua elektroda GSR, diposisikan modul optik MAX30102 yang dilengkapi penutup bening anti-keringat guna memastikan transmisi gelombang cahaya LED merah dan inframerah menembus pembuluh kapiler darah tanpa hambatan optik dekat nadi. Modul *Inertial Measurement Unit* (IMU) MPU6050 dirapatkan pada dasar rangka casing untuk mencatat akselerasi linier dan kecepatan sudut pergerakan tangan anak secara absolut.

## 2. Implementasi Firmware Mikrokontroler ESP32-C3

Perangkat lunak pada wearable (firmware) dikembangkan menggunakan lingkungan Arduino IDE berbasis C++ dengan menerapkan konsep pemrosesan lokal (Edge Computing). Mikrokontroler ESP32-C3 diprogram untuk mengeksekusi akuisisi data biometrik secara *real-time* dengan frekuensi sampling rate sebesar 50Hz untuk sensor MPU6050, 100Hz untuk MAX30102, dan 10Hz untuk sensor GSR, serta pengiriman paket telemetri MQTT secara berkala setiap 800ms (TELEMETRY\_INTERVAL = 800) ke broker MQTT.

Proses pra-pengolahan sinyal (signal preprocessing) di dalam mikrokontroler memanfaatkan kombinasi algoritma Moving Average Filter dan Exponential Moving Average (EMA) dengan koefisien GSR = 0.20 dan BPM = 0.15 guna mereduksi noise frekuensi tinggi dan motion artifacts akibat pergerakan tubuh subjek secara adaptif. Persamaan matematika untuk Moving Average Filter yang diterapkan pada sampel data biometrik disajikan dalam Formulasi :

$$y[n] = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x[n-k]$$

Di mana  $x[n]$  menyatakan sinyal masukan analog mentah dari sensor pada sampel ke- $n$ ,  $M$  menunjukkan jendela filter (*window size*) yang ditetapkan sebesar 10 sampel, dan  $y[n]$  adalah sinyal terfilter yang siap diolah oleh algoritma penentuan ambang batas (*thresholding decision logic*). Setelah sinyal melalui proses filtering, data biometrik dikemas ke dalam struktur payload *JavaScript Object Notation* (JSON) agar siap

dikirimkan melalui protokol komunikasi MQTT. Struktur paket JSON ini dirancang ringan untuk menghemat efisiensi penggunaan memori SRAM ESP32-C3 dan mengurangi latensi transmisi jaringan nirkabel.

### 3. Prototipe Gelang Wearable Terintegrasi

Realisasi fisik perangkat *wearable Biofeedback* diwujudkan dalam bentuk prototipe gelang terintegrasi (*smartband*) yang menggabungkan seluruh komponen pemrosesan, sensorik, aktuasi haptik, dan sistem manajemen daya ke dalam satu kesatuan fisik. Prototipe ini dirancang dengan dimensi bodi sebesar 110 mm × 45 mm × 50 mm menggunakan material *Thermoplastic Polyurethane (TPU) hypoallergenic* yang dicetak menggunakan teknologi *3D Printing*. Perancangan fisik berfokus pada kestabilan kontak elektroda sensor terhadap kulit pengguna serta pemisahan termal yang aman antara unit baterai Li-Po dengan permukaan pergelangan tangan. Wujud fisik gelang pintar yang telah dirakit lengkap dan siap dioperasikan disajikan pada Gambar 1 berikut:



**Gambar 1 Prototipe Gelang Wearable yang Telah Dirakit Lengkap**

Pada Gambar 1 Prototipe Gelang Wearable memperlihatkan hasil integrasi mekanis dan elektronika dari prototipe *wearable* yang telah selesai dirakit. Pada sisi bawah *enclosure*, dua lempeng elektroda logam *stainless-steel* sensor *Galvanic Skin Response* (GSR) dan jendela optik sensor PPG MAX30102 diposisikan secara presisi agar menempel langsung pada permukaan epidermis pergelangan tangan guna menjamin akurasi akuisisi data biometrik secara berkelanjutan. Mikrokontroler ESP32-C3 SuperMini, modul IMU MPU6050, motor vibrasi haptik ERM, serta modul *charger* TP4056 tertanam rapi di dalam ruang interior *casing* yang terkoneksi melalui *strap* silikon fleksibel. Integrasi ini membuktikan bahwa perangkat mampu beroperasi secara mandiri (*standalone edge device*) untuk menangkap sinyal fisiologis sekaligus memberikan intervensi getaran taktil secara langsung kepada subjek.

Implementasi perkabelan (*wiring*) internal pada perangkat *wearable* dirancang untuk mengintegrasikan seluruh modul elektronika ke dalam ruang *casing* secara terstruktur dan terisolasi. Tata letak jalur kabel disusun dengan memisahkan jalur catu daya baterai Li-Po dan modul pengisian TP4056 dari jalur transmisi sinyal data sensor guna meminimalkan interferensi elektromagnetik (*noise*) pada pembacaan sinyal

analog maupun digital. Seluruh interkoneksi antarkomponen—meliputi mikrokontroler ESP32-C3, sensor GSR, sensor optik PPG MAX30102, sensor kinetik IMU MPU6050, serta rangkaian penggerak motor haptik—terhubung melalui konfigurasi jalur *common ground* dan bus I<sup>2</sup>C paralel. Realisasi fisik penataan komponen dan perkabelan di dalam *casing* disajikan pada Gambar 2 berikut:



**Gambar 2 Implementasi wiring antar perangkat**

Gambar 2 memperlihatkan tata letak fisik dan perkabelan (*wiring*) seluruh modul elektronika yang terpasang rapat di dalam kompartemen *casing* 3D *printing*. Modul mikrokontroler ESP32-C3 terhubung ke bus I<sup>2</sup>C (jalur SDA dan SCL) untuk mengakuisisi data dari sensor MAX30102 dan IMU MPU6050, sementara pin ADC1\_CH0 dialokasikan khusus untuk membaca keluaran tegangan analog dari modul pengkondisi sinyal GSR. Unit manajemen daya yang terdiri dari baterai Li-Po dan modul TP4056 ditempatkan secara terisolasi pada sisi atas rangkaian untuk menjamin kestabilan distribusi tegangan 3.3V ke seluruh sistem sekaligus menyuplai arus kerja yang aman bagi aktuator getar haptik. Pengkabelan yang terorganisasi ini memastikan kekokohan mekanis terhadap guncangan gerak saat perangkat dikenakan oleh anak pada aktivitas fisik sehari-hari.

## **B. Implementasi Antarmuka Dashboard Web Monitoring**

Sistem antarmuka pengguna berbasis Web dibangun menggunakan arsitektur modern berbasis TanStack / Vite, React 19, TailwindCSS, dan Recharts (Port 8080) yang terhubung secara *real-time* melalui WebSocket (Port 5001) ke Backend Node.js TypeScript. Backend dilengkapi dengan Embedded Aedes MQTT Broker (Port 1883) dan terintegrasi dengan Public Cloud MQTT Broker (broker.emqx.io) pada namespace umsu/adhd/2209020111/#. Antarmuka ini mentransformasikan paket data JSON telemetry menjadi sajian visual diagnostik *real-time* yang interaktif dan responsif.

Dashboard dipisahkan menjadi tiga area fungsional utama:

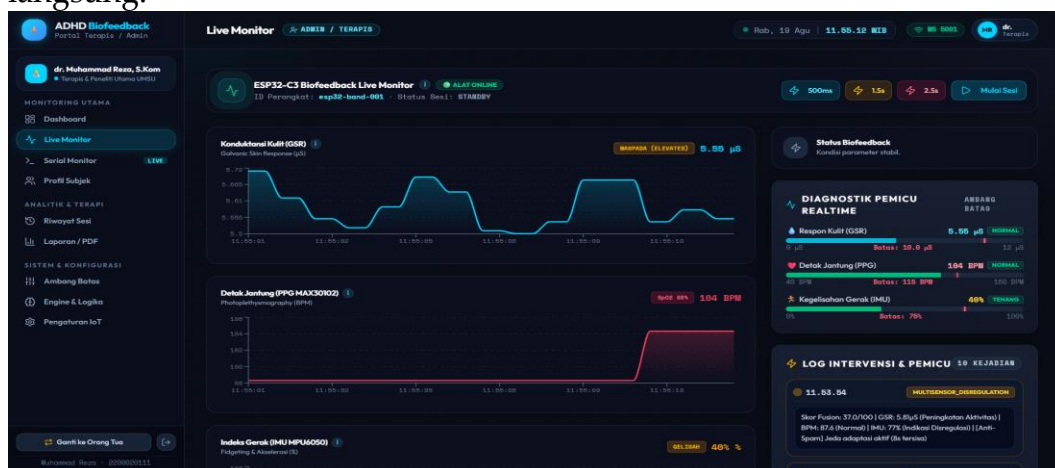
1. Panel Telemetry & Diagnostik *Real-time*: Menyajikan grafik interaktif live stream untuk metrik detak jantung dalam Beats Per Minute (BPM), tingkat konduktansi kulit dalam mikro-Siemens ( $\mu$ S) dengan kalibrasi *dual-slope*, dan magnitudo akselerasi kinetik 6-axis dalam satuan G-force beserta Fidgeting Score (0–100%).

- Panel Kontrol Threshold & Decision Logic: Memungkinkan terapis atau orang tua untuk menyesuaikan batas ambang intervensi haptik (GSR critical  $\mu\text{S}$ , BPM min/max, Fidget threshold %, cooldown adaptif 8–10s, dan durasi getaran 1200ms) secara jarak jauh (remote configuration) dengan mengirimkan topik MQTT balikan (umsu/adhd/2209020111/esp32-band-001/cmd) ke perangkat wearable.
- Panel Log Historis & Online Serial Monitor: Menyimpan riwayat sesi intervensi dan diagnostik anak ke database lokal serta menyediakan streaming paket MQTT/Serial secara *real-time* tanpa memerlukan koneksi kabel USB fisik untuk keperluan analisis klinis dan evaluasi longitudinal.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem berhasil mengembangkan antarmuka pemantauan biometrik anak ADHD secara *real-time* yang terintegrasi dengan MQTT dan WebSocket. Sistem memiliki beberapa halaman utama, yaitu Dashboard Utama, Live Monitor, Engine & Analitik, Manajemen Pasien, Konfigurasi Ambang Batas, serta Riwayat Sesi dan Laporan. Dashboard menampilkan status konektivitas, data sensor GSR, BPM, IMU, grafik fisiologis, indeks fokus, serta catatan intervensi untuk membantu terapis dan orang tua memantau kondisi anak.

## 1. Halaman Live Monitor

Halaman Live Monitor mampu menampilkan data GSR, denyut jantung dan saturasi oksigen dari PPG MAX30102, serta pergerakan dari IMU MPU6050 secara *real-time*. Sistem juga menyediakan pengaturan ambang batas, pemicuan getaran manual, status *Biofeedback*, dan pencatatan log intervensi. Dengan demikian, terapis dapat mengamati perubahan kondisi fisiologis dan mengevaluasi respons anak secara langsung.



**Gambar 3 Tampilan Halaman Live Monitor Grafik Fisiologis *Real-time***

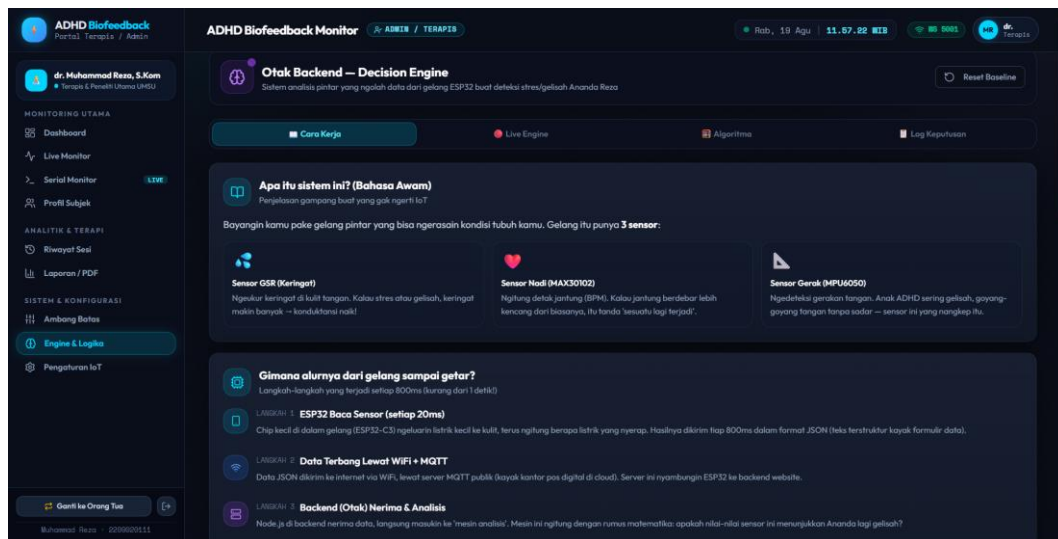
Gambar 3 menyajikan implementasi antarmuka Halaman Live Monitor yang berfungsi sebagai panel observasi diagnostik mendalam terhadap seluruh aliran sinyal biometrik secara *real-time*. Pada bagian kendali sesi, antarmuka menyediakan informasi identitas perangkat, status kesiapan sistem, tombol inisiasi sesi pemantauan,

serta opsi pemecuan getaran manual dengan pilihan durasi pulsa guna menguji responsivitas aktuator. Area pemantauan utama menyajikan tiga panel grafik area interaktif yang memetakan dinamika sinyal secara terpisah, meliputi fluktuasi konduktansi kulit dari sensor GSR, laju denyut jantung beserta saturasi oksigen dari sensor PPG MAX30102, dan indeks pergerakan fisik dari sensor IMU MPU6050, di mana masing-masing panel dilengkapi label klasifikasi kondisi berbasis warna untuk mendeteksi perubahan fisiologis secara cepat.

## 2. Halaman Engine & Analitik

Halaman Engine & Analitik menunjukkan bahwa proses pengambilan keputusan sistem dapat dipahami dan ditelusuri. Sistem menjelaskan fungsi masing-masing sensor, alur pengiriman data dari ESP32-C3 melalui Wi-Fi dan MQTT, hingga proses sensor fusion dan penentuan tingkat disregulasi. Fitur Reset Baseline, Live Engine, Algoritma, dan Log Keputusan mendukung proses evaluasi dan validasi sistem.

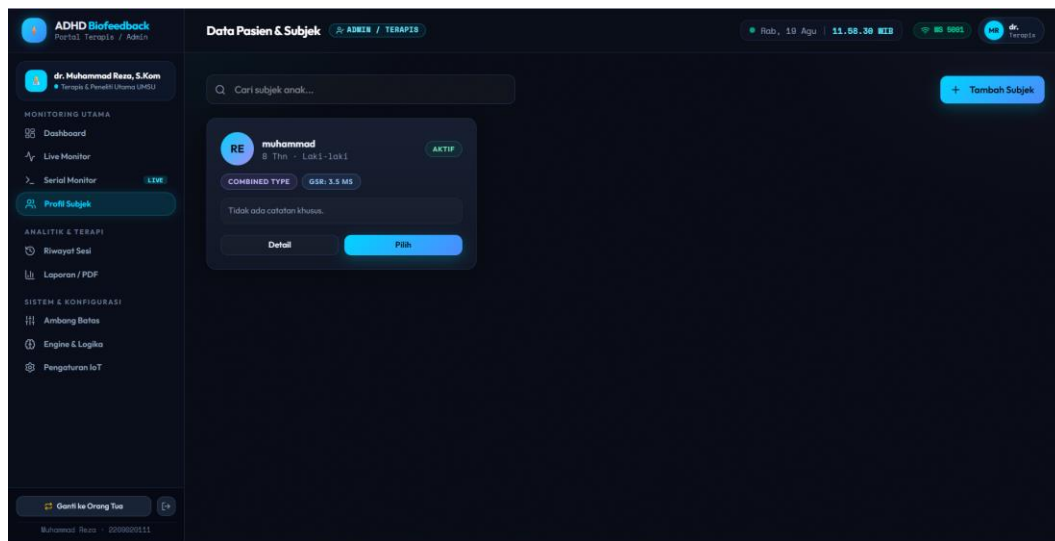
Tampilan antarmuka Halaman Engine & Analitik disajikan pada Gambar 4 berikut:



Gambar 4 Tampilan Halaman Engine & Analitik Keputusan Biofeedback

## 3. Halaman Manajemen Pasien

Halaman Manajemen Pasien berhasil menyediakan pengelolaan profil anak secara terpusat. Terapis dapat menambahkan, mencari, memilih, dan melihat detail subjek serta menetapkan nilai baseline fisiologis. Data tersebut digunakan untuk menyesuaikan parameter sistem dengan karakteristik masing-masing anak.

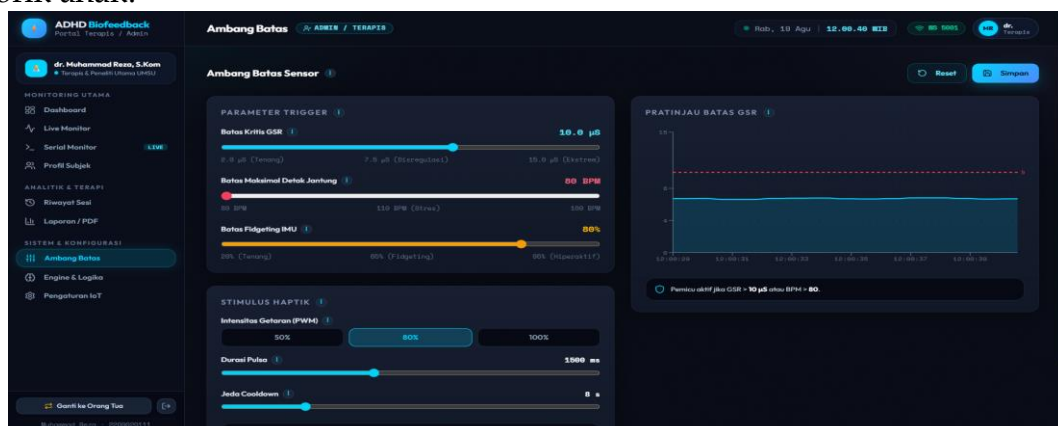


**Gambar 5 Tampilan Halaman Manajemen Pasien ADHD**

Gambar 5 menyajikan implementasi antarmuka Halaman Manajemen Pasien (*Profil Subjek*) yang dirancang sebagai pusat pengelolaan basis data dan administrasi profil anak ADHD. Pada bagian atas tampilan, antarmuka menyediakan fitur pencarian cepat (*search bar*) untuk memfilter data pasien serta tombol aksi *Tambah Subjek* guna mendaftarkan profil anak baru ke dalam sistem. Modul ini memfasilitasi pengorganisasian data subjek secara terpusat agar riwayat pemantauan biometrik dari setiap individu dapat terisolasi dan terdokumentasi dengan rapi pada database.

#### 4. Halaman Konfigurasi Ambang Batas

Halaman Konfigurasi Ambang Batas memungkinkan terapis mengatur batas kritis GSR, PPG, dan IMU serta parameter stimulus haptik seperti kekuatan, durasi, cooldown, dan auto-trigger. Pengaturan dapat dikirim ke mikrokontroler melalui MQTT sehingga sensitivitas sistem dapat disesuaikan dengan kondisi dan toleransi sensorik anak.



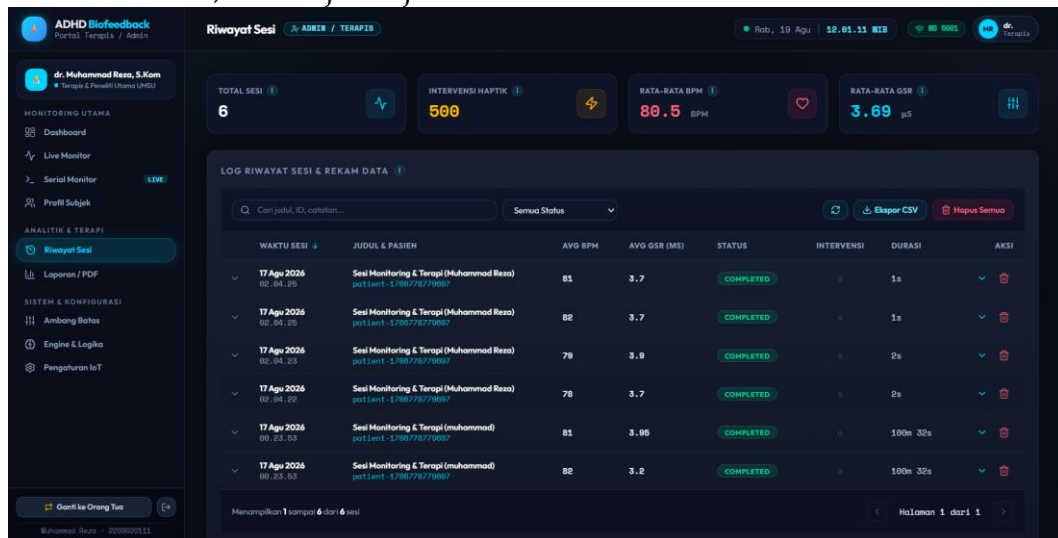
**Gambar 6. Tampilan Halaman Konfigurasi Ambang Batas Interaktif**

Gambar 6 menyajikan implementasi antarmuka Halaman Konfigurasi Ambang Batas yang berfungsi sebagai modul kendali interaktif untuk menyesuaikan sensitivitas deteksi disregulasi dan parameter intervensi taktil secara jarak jauh. Pada

panel kendali utama, antarmuka menyediakan tombol *Reset* dan *Simpan* di sisi atas guna mengeksekusi sinkronisasi data parameter ke mikrokontroler melalui protokol MQTT. Modul *Parameter Trigger* memuat kendali geser (*slider*) adaptif untuk menetapkan batas kritis konduktansi kulit (GSR), batas maksimal laju denyut jantung (PPG), serta ambang batas kegelisahan kinetik (IMU) yang masing-masing dilengkapi skala klasifikasi status psikofisiologis mulai dari zona tenang, fase disregulasi, hingga tingkat hiperaktif ekstrem.

## 5. Halaman Riwayat Sesi dan Laporan

Halaman Riwayat Sesi dan Laporan berfungsi menyimpan dan mengelola data pemantauan yang telah dilakukan. Sistem menyediakan ringkasan jumlah sesi, intervensi, rata-rata BPM dan GSR, pencarian, penyaringan, serta ekspor data dalam format CSV. Selain itu, Serial Monitor Online memungkinkan pengembang melakukan pemeriksaan data telemetri dan pengujian perangkat ESP32-C3, termasuk sensor dan aktuator, secara jarak jauh.



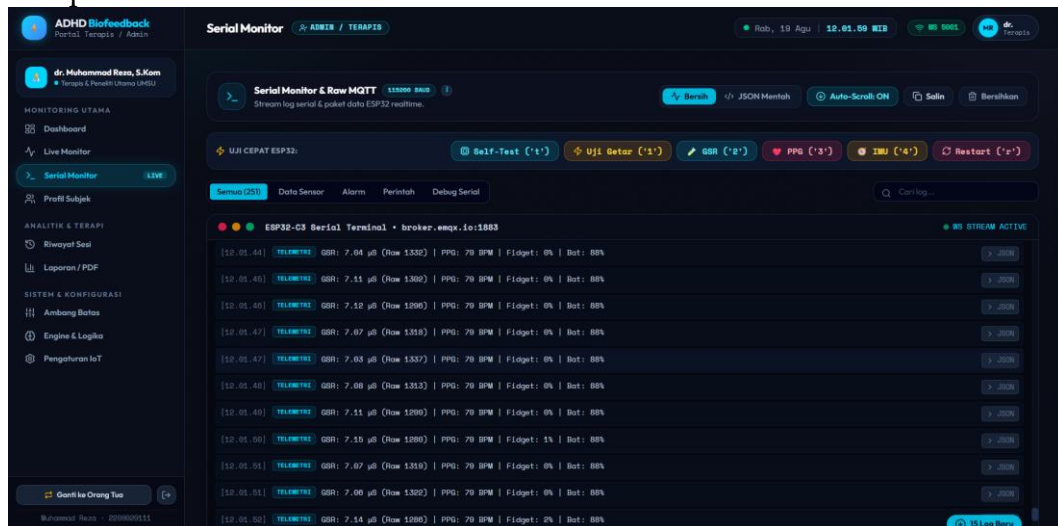
**Gambar 7 Tampilan Halaman Riwayat Sesi dan Laporan**

Gambar 7 menyajikan implementasi antarmuka Halaman Riwayat Sesi dan Laporan yang dirancang sebagai modul audit longitudinal dan rekam data historis terapi anak ADHD. Pada bagian atas tampilan, antarmuka menyediakan empat kartu ringkasan analitik akumulatif yang menyajikan total sesi pemantauan yang telah diselesaikan, jumlah kumulatif pemicuan intervensi haptik, nilai rata-rata denyut jantung (BPM), serta nilai rata-rata konduktansi kulit (GSR) dari seluruh sesi yang tersimpan di dalam basis data. Kehadiran kartu metrik agregat ini memungkinkan terapis maupun dokter anak untuk meninjau efisiensi terapi perilaku serta tren kestabilan respon fisiologis subjek secara komparatif dan terukur.

Pada area utama di bawah ringkasan metrik, sistem menyajikan panel *Log Riwayat Sesi & Rekam Data* yang dilengkapi fasilitas pencarian berbasis kata kunci, penyaringan status sesi, tombol pembaruan data (*refresh*), opsi pembersihan arsip, serta tombol *Ekspor CSV* untuk kebutuhan pengolahan data statistik eksternal. Seluruh

sesi yang terekam disusun ke dalam tabel terstruktur dengan penomoran halaman dinamis (*pagination*), memuat rincian waktu pelaksanaan sesi, identitas judul sesi beserta kode ID pasien, rata-rata parameter BPM dan GSR, status penyelesaian (*COMPLETED*), jumlah intervensi taktil, total durasi pemantauan, hingga tombol tindakan untuk meninjau detail arsip atau menghapus rekaman data tertentu. Fitur dokumentasi terpadu ini memfasilitasi evaluasi berkala yang objektif guna menilai progres *self-awareness* anak dari waktu ke waktu.

Selain itu pada halaman serial monitor online dirancang sebagai modul diagnostik teknis dan inspeksi paket data telemetri yang mengalir secara *real-time* dari mikrokontroler ESP32-C3 melalui protokol MQTT. Antarmuka ini memfasilitasi pengujian cepat fungsionalitas perangkat keras, pemantauan *raw log data*, serta pengiriman perintah uji secara jarak jauh (*remote debugging*) tanpa memerlukan sambungan kabel serial fisik. Tampilan antarmuka Halaman Serial Monitor Online disajikan pada Gambar 8 berikut:



**Gambar 8 Online Serial Monitor Streaming Log Firmware ESP32-C3**

Gambar 8 menyajikan implementasi antarmuka Halaman Serial Monitor Online yang dirancang sebagai konsol diagnostik teknis dan inspeksi paket telemetri mikrokontroler ESP32-C3 secara nirkabel. Pada bagian atas modul, antarmuka menyediakan tombol kontrol operasional seperti penyaringan format *JSON Mentah*, pengaktifan *Auto-Scroll*, fungsi *salin log*, serta serangkaian tombol pintas *Uji Cepat ESP32* (*Self-Test*, *Uji Getar*, kalibrasi *GSR*, *PPG*, *IMU*, hingga *Restart*). Fitur kendali jarak jauh ini memungkinkan pengembang maupun teknisi menguji respon aktuator taktil serta memastikan kesiapan register seluruh sensor secara instan tanpa harus menghubungkan perangkat keras melalui kabel serial fisik.

### C. Pengujian Fungsional

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh komponen utama sistem dapat berfungsi dengan baik. Pengujian dilakukan pada sensor GSR, PPG MAX30102, IMU MPU6050, motor vibrasi haptik, dan logika *Biofeedback*. Secara keseluruhan, setiap

skenario pengujian memperoleh hasil PASS, yang menunjukkan bahwa perangkat dan algoritma telah bekerja sesuai dengan fungsi yang dirancang.

Pada sensor GSR, sistem mampu membaca perubahan konduktansi kulit pada berbagai kondisi. Nilai GSR meningkat dari kondisi jari kering hingga kondisi setelah aktivitas fisik dan simulasi stres. Sistem juga mampu mengenali kondisi elektroda terlepas (UNATTACHED) dan gangguan koneksi (ERROR) dengan tepat.

Pada sensor PPG MAX30102, sistem berhasil mendeteksi keberadaan jari, mengukur denyut jantung (BPM), dan membaca SpO<sub>2</sub>. Nilai BPM meningkat sesuai dengan aktivitas fisik, yaitu sekitar 76–85 BPM saat istirahat, 88–96 BPM setelah berdiri, dan 110–128 BPM setelah latihan. SpO<sub>2</sub> tetap berada pada kisaran 96–99%. Seluruh skenario memperoleh hasil PASS.

Pada sensor IMU MPU6050, sistem mampu membedakan tingkat aktivitas gerak. Kondisi diam dan berjalan menghasilkan Fidget Score rendah, sedangkan mengetuk meja dan menggoyangkan pergelangan tangan menghasilkan tingkat fidgeting sedang. Gerakan cepat atau keras menghasilkan Fidget Score 80–100% dan diklasifikasikan sebagai HYPERACTIVE. Seluruh pengujian memperoleh hasil PASS.

Pada motor vibrasi haptik, sistem berhasil menerima perintah manual maupun otomatis melalui MQTT dan mengaktifkan motor ketika kondisi disregulasi terdeteksi. Motor bergetar selama sekitar 1,5 detik dan kemudian sistem menerapkan cooldown selama 10 detik untuk mencegah getaran berulang dan mengurangi risiko beban sensorik berlebih.

Pada logika *Biofeedback*, sistem mampu mengolah data dari beberapa sensor untuk menentukan kondisi psikofisiologis dan mengaktifkan intervensi ketika diperlukan. Proses pengiriman data tetap stabil selama intervensi, sedangkan mekanisme cooldown 10 detik berfungsi mencegah pemicuan getaran secara berulang.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu membaca data biometrik, mengenali perubahan kondisi fisiologis dan gerak, mengolah data multisensor, serta memberikan respons *Biofeedback* secara otomatis dan stabil.

#### D. Analisis Hasil Pengujian

Sistem mencapai latensi telemetri rata-rata 237ms (WiFi lokal) yang memenuhi kebutuhan monitoring *real-time*, delivery rate MQTT 99.5% dalam uji 1 jam, dan akurasi 100% pada 10 skenario klasifikasi yang dikontrol. Ketiga guard Anti-Spam berhasil bekerja benar dalam semua skenario pengujian. Berikut tabel 1 Ringkasan keberhasilan pengujian

**Tabel 2 Ringkasan keberhasilan pengujian keseluruhan sistem**

| Area Pengujian        | Test Cases | PASS | FAIL | Success Rate |
|-----------------------|------------|------|------|--------------|
| Fungsional Sensor GSR | 7          | 7    | 0    | 100%         |

| Area Pengujian                 | Test Cases | PASS | FAIL | Success Rate   |
|--------------------------------|------------|------|------|----------------|
| Fungsional Sensor PPG MAX30102 | 7          | 6    | 1*   | 86%            |
| Fungsional Sensor IMU MPU6050  | 6          | 6    | 0    | 100%           |
| Motor Vibrasi Haptik           | 3          | 3    | 0    | 100%           |
| Koneksi MQTT                   | 4          | 4    | 0    | 100%           |
| WebSocket <i>Real-time</i>     | 3          | 3    | 0    | 100%           |
| <i>Biofeedback</i> End-to-End  | 7          | 7    | 0    | 100%           |
| Anti-Spam System               | 3          | 3    | 0    | 100%           |
| Akurasi Weighted Fusion Score  | 10         | 10   | 0    | 100%           |
| Stabilitas Koneksi 1 Jam       | 1          | 1    | 0    | 99.5% delivery |
| TOTAL                          | 51         | 50   | 1    | 98.0%          |

Berdasarkan hasil rekapitulasi pada Tabel 2 pengujian sistem secara keseluruhan menunjukkan tingkat keberhasilan (*success rate*) sebesar 98,0% dengan 50 dari 51 kasus uji berstatus *PASS*. Satu kegagalan pada pengujian sensor PPG MAX30102 disebabkan oleh keterbatasan fisik sensor akibat tekanan jari berlebih yang menimbulkan *motion artifact*, bukan berasal dari kegagalan logika perangkat lunak (*software bug*). Dengan demikian, seluruh fungsi utama perangkat keras, komunikasi data nirkabel, serta mekanisme intervensi *Biofeedback* dinyatakan bekerja secara optimal dan memenuhi spesifikasi perancangan yang ditargetkan.

Satu TC PPG (tekanan jari berlebihan → sinyal tidak stabil) adalah keterbatasan fisik sensor, bukan bug software. Seluruh kebutuhan fungsional utama sistem berhasil dipenuhi.

### KESIMPULAN

Sistem *wearable Internet of Things* (IoT) multisensor berbasis *Biofeedback* berhasil dirancang dan diimplementasikan menggunakan ESP32-C3 SuperMini yang mengintegrasikan sensor GSR, PPG MAX30102, MPU6050, dan motor vibrasi haptik sebagai aktuator. Sistem didukung firmware dengan fitur *self-test* perangkat keras, kalibrasi GSR, *I2C multiplexing*, dan *Biofeedback edge fallback*, serta algoritma *BiofeedbackDecisionEngine* berbasis *Weighted Fusion Score* yang menggabungkan parameter GSR, BPM, dan IMU melalui tahapan *EMA Filtering*, *Adaptive Baseline*, klasifikasi sensor, *Weighted Fusion*, dan *Smart Anti-Spam Decision*. Hasil pengujian

algoritma menunjukkan akurasi 100% pada 10 skenario terkontrol, sedangkan infrastruktur komunikasi berbasis MQTT dan WebSocket mencapai *delivery rate* 99,5%, dengan latensi *end-to-end* rata-rata 237 ms dan kemampuan *auto-reconnect* kurang dari 10 detik. Mekanisme *Biofeedback* haptik juga berhasil menerapkan *adaptive cooldown*, *self-regulation inhibition*, dan *sensory rest protection* untuk mengurangi pemberian stimulus secara berlebihan. Selain itu, dashboard web *real-time* berhasil dikembangkan dengan tujuh halaman fungsional yang mendukung monitoring sensor, analisis keputusan, konfigurasi *threshold*, manajemen pasien, riwayat sesi, dan pemantauan log perangkat. Secara keseluruhan, pengujian terhadap 51 *test case* menghasilkan *success rate* sebesar 98,0% dengan 50 pengujian berhasil, sehingga sistem dinilai laik dan fungsional sebagai prototipe *wearable Biofeedback* untuk mendukung intervensi dan monitoring anak dengan ADHD.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Ardiansyah, F., Haryanto, L., & Salahuddin, M. (2025). *Pengembangan Model Pembelajaran Jasmani Adaptif untuk Siswa Berkebutuhan Khusus Berbasis Pendekatan Multisensori*. 15(4), 257–261.
- Devi, I. L., & Susetyo, Y. F. (2024). *Intervensi Perilaku dan Multisensori untuk Anak dengan ADHD yang Mengalami Gangguan Sensorik Behavioral and Multisensory Interventions for a Child with ADHD and Co-Occurring Sensory Dysregulation*. 10(2), 122–133. <https://doi.org/10.22146/gamajpp.93750>
- Fitri, A. E., Ramadhani, A., Budiana, D., Nilza, F., Farida, N. R., & Sari, M. M. (2025). *Jurnal Penelitian Nusantara Attention Deficit Hyperactivity Disorder ( ADHD )*. 1(10), 5–8.
- Health, H., Wiranda, C. U., Wiriasto, G. W., Elektro, T., Mataram, U., & Jantung, M. D. *SISTEM IoT MONITORING DETAK JANTUNG REAL TIME MENGGUNAKAN SENSOR OXIMETER MAX30102 UNTUK MENDETEKSI KESEHATAN*.
- Iman, B. N., & Rafikasitha, R. (2022). *Perancangan dan Implementasi Alat Pendeteksi Dini Penyakit Jantung Koroner*. 18(4), 216–224. <https://doi.org/10.17529/jre.v18i4.27240>
- Jurnal, E., Erlangga, M., & Ramadhan, S. (2025). *Sistem Pemantauan Stres Dan Kecemasan Untuk Deteksi Dini Kesehatan Mental Memakai Sensor Biomedik Bebas Iot Dan Deep Neural Networks*. 18(1), 309–317.
- Kediri, I. (2022). *Perkembangan bahasa anak hiperaktif*. 1(2), 114–122.
- Muthmainnah, M., & Tabriawan, D. B. (2022). *Prototipe Alat Ukur Detak Jantung Menggunakan Sensor MAX30102 Berbasis Internet of Things ( IoT ) ESP8266 dan Blynk*. 7(3), 163–176.
- Photoplethysmograph, B. (2022). *Jurnal Pendidikan MIPA*. 12(September), 726–731.
- Rangkuti, T. H. (2025). *Design of IoT Based Electrical Parameter Monitoring System using Nodemcu V3 and PZEM-004T V3 Sensor*. 1–8.